Las esferitas de vidrio del polvo lunar

S. Tolansky

Antes de los alunizajes del primer «Apollo», el autor de este artículo había predicho que la superficie lunar estaría cubierta por cantidades inmensas de esferitas vítreas. Esta predicción se confirmó al examinar las muestras de polvo lunar. Describe el autor sus investigaciones sobre tales muestras mediante una técnica especial de interferometría, y propone hipótesis para explicar tanto la existencia como la abundancia de las esferitas.

Basándonos en la consideración de ciertas propiedades superficiales de las tectitas australitas, pudimos predecir (sesión de la *Royal Society*, Londres, Febrero 1969) que la superficie de la Luna estaría probablemente recubierta por un número enorme de diminutas esferas de vidrio, como las bolitas infantiles. Esta predicción fue reiterada en una nota posterior que describía algunos estudios interferométricos sobre tectitas australitas en el *British Museum* [1]. Cuando por gentileza de la organización NASA, de los EE.UU., recibimos en septiembre de 1969 dos pequeñas muestras de los finos de polvillo lunar recogido por los astronautas del «Apollo 11», hallamos efectivamente en estos 5 g de polvo más de dos centenares de esferas vítreas y cuerpos parecidos, lo suficientemente grandes para poder separarlos con pinzas. Además, observamos un número enorme de esferillas mucho más diminutas, con tamaños decrecientes hasta el límite de la resolución de un buen objetivo de microscopio de 4 mm. Tales cuerpos, demasiado abundantes para contarlos, aparecían visibles en gran número incluso en una preparación sobre portaobjetos.

El 5 de enero de 1970 se celebró en Houston, Tejas, una reunión donde todos los varios centenares de investigadores dedicados a estudiar el material traído de la Luna, presentaron informes preliminares sobre sus hallazgos. Varios grupos de investigadores independientes comunicaron haber encontrado pequeñas esferas de vidrio. Diversos observadores estuvieron de acuerdo en cuanto al tamaño, composición química, índice de refracción, densidad y otras propiedades. Nosotros somos los únicos que nos hemos servido de la interferometría para el mejor estudio de estos cuerpos.

El estudio interferométrico estaba ya decidido antes de la partida del «Apollo 11», pues se confiaba de antemano en la existencia y recogida de esferas vítreas lunares, y se había supuesto que pudieran ser pequeñas, Preparamos, desarrollamos y probamos previamente técnicas interferométricas para estudiar una gama extraordinariamente amplia de tamaños de esferitas de vidrio. Para ello se coleccionó una variedad considerable de perlitas, diminutas bolas de vidrio fabricadas comercialmente para usar, por ejemplo, en lechos de filtros químicos. Se obtienen lanzando un dardo de llama sobre finas varillas o fibras de vidrio, y pueden conseguirse de tamaños muy pequeños. Cuando se recibió el polvillo lunar pudimos pues obtener fácil y rápidamente interferogramas de objetos con diámetro de 10 μm e incluso menores.

La NASA nos asignó dos muestras diferentes, de 5 g cada una. La muestra A, verdaderos finos había sido pasada por tamiz de 1 mm antes de recibirla y contenía partículas de tamaño entre 1 mm y submicroscópico. La muestra B contenía materiales con dimensiones nominales entre 1–10 mm, pero además una notable cantidad de gránulos de polvillo más fino. Interesa destacar que aunque pudimos separar más de 200 cuerpos del material fino de la muestra A, encontramos en la muestra B solamente 12 pequeños objetos esféricos y comparables en tamaño con los procedentes de A. Sin duda se habían introducido a través de la considerable cantidad de polvillo fino que revestía inevitablemente los mayores fragmentos de B. Aquí trataremos casi enteramente de lo hallado en la muestra A. Los objetos vítreos esféricos y los afines descritos a continuación fueron separados con pinzas. La extracción fue sumamente difícil y consumió muchos cientos de horas de selección con ayuda de un microscopio. Ello se debió en parte a la manera tenaz en que el polvillo cubría los objetos, al parecer porque con facilidad toma carga electrostática incluso por simple roce con la aguja de separación. Además, encontramos que una proporción bastante grande de los cuerpos y parte del propio polvillo tenían propiedades magnéticas. Esto dio lugar a complicaciones, hasta que recurrimos a un desmagnetizador del tipo sencillo que se utiliza en los grabadores de cinta. A este respecto puede señalarse que, analizando con microsonda electrónica [2] las esferitas extraídas, se han hallado en muchas de ellas pequeñas inclusiones de hierro libre, hallazgo confirmado por diversos investigadores posteriormente [3–5].

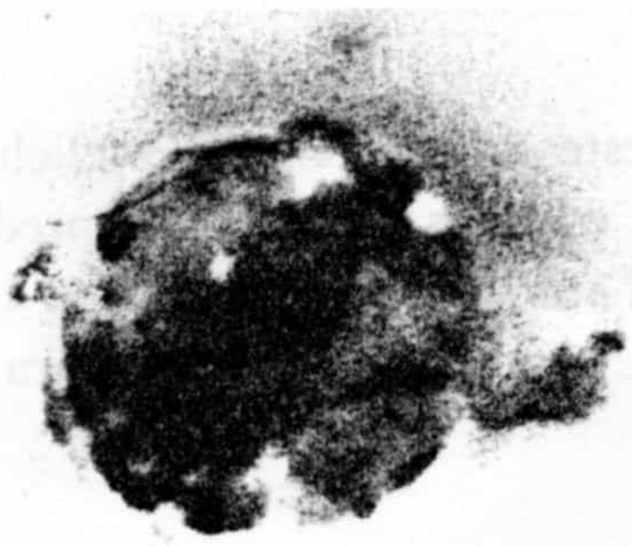
Las cláusulas originales convenidas con la NASA imponían una restricción adicional, por habernos comprometido formalmente a que durante los estudios no se dañaran las muestras, de modo que las recibidas, después de su análisis óptico y por rayos X, pudieran devolverse intactas cuando se así solicitara. Puesto que considerábamos fundamental cumplir esa condición, nos impusimos numerosas limitaciones en nuestras manipulaciones. Así, renunciamos a las ventajas de los métodos de flotación en las separaciones y a los métodos de inmersión para determinar el índice de refracción. De todos modos, en la reunión de la NASA muchos investigadores, al parecer no tan sujetos a limitaciones, expusieron análisis químicos, mediciones de índice de refracción, etc.; estos datos independientes fueron tan concordantes que no hemos dudado en considerarlos aplicables a nuestra muestra que procede de las inmediaciones del lugar de donde se tomaron las otras.

S. Tolansky

Nació en Newcastle-upon-Tyne (1907) y estudió en Newcastle, Berlín y Londres. Desempeñó misiones docentes en la Universidad de Manchester en 1934, y fue nombrado profesor de Física en la Universidad de Londres *(Royal Holloway College)* en 1947. Sus intereses científicos se centran principalmente en temas de óptica y microestructura de superficies.

Las esferitas

A lo sumo, en la muestra A los objetos separables más grandes no podían rebasar 1 mm de diámetro. En efecto, se hallaron esferitas hasta de ese tamaño. Se han separado



de varios tipos característicos (Fig. 1), donde el mayor objeto representado tiene 0,75 mm de diámetro. Muchos de los cuerpos encontrados son translúcidos, de color ambarino o rojo pardo, algunos son verde pálido con lustre metálico y transparentes, mientras que en una gran proporción son gris obscuro con lustre metálico y prácticamente opacos. Una esferita, reproducida arriba en color con gran aumento (×3000), es de azul zafiro obscuro, algo moteada en rojo y con polvillo ambarino todavía adherido. Con gran aumento hemos observado también numerosas esferitas minúsculas azul obscuro, que han de poseer intensa coloración propia dado su pequeño espesor. Muchas tienen 3 μm o menos.

En muchas de las esferitas de vidrio se ven vacuolas internas o ampollas cerca de la superficie. Estos cuerpos no se componen de cáscaras delgadas, pues salvo pequeñas vacuolas locales son macizos y vítreos. En este sentido difieren de los conocidos glóbulos seudoesféricos que hay en las cenizas volantes de las chimeneas de hornos, que son siempre mucho menores que los objetos en cuestión. Una parte considerable de estos objetos tiene uno o varios aditamentos a modo de cola (Fig. 2). Parece tratarse de polvillo originario sinterizado, que es muy adherente y difícil de eliminar por entero. Se puede imaginar que tales cuerpos vítreos han sido alguna vez proyectiles de gran velocidad que, al llegar al suelo y chocar con la superficie del polvo gris se lo han agregado formando los apéndices. Estas colas son bastante abundantes.

Otras características sugieren también que muchos de los cuerpos separados han sido proyectiles. En primer lugar, algunos están partidos, pero más significativo es el aspecto común de los microcráteres de impacto (Fig. 3). En su centro se suele hallar una diminuta partícula sólida (¿cristalina?) de roca, a menudo del mismo color que la propia esferilla. Es casi seguro que ha chocado con ésta, empotrándose en el vidrio. En torno al corpúsculo extraño hay una depresión quebrada, a veces con un borde prominente. Después daremos pruebas interferométricas del choque de proyectiles con las esferitas. Conviene recordar aquí que en la Luna, por la falta de atmósfera, cualquier objeto (incluso los muy pequeños) caerá por efecto de la gravitación lunar con la misma velocidad de choque que cualquier gran roca despedida. En la superficie sin atmósfera de la Luna no es posible la existencia de una nube flotante de partículas en lento descenso.

Unos cuarenta objetos (Fig. 4) fueron al principio, probablemente en su mayoría, esferitas de vidrio que, no obstante, de algún modo han adquirido un recubrimiento muy basto de polvo endurecido. Dan la impresión de cuerpos vítreos calientes que han rodado en polvo lunar también caliente pues, en ciertos casos, el recubrimiento es incompleto y se ven zonas subyacentes vítreas lisas. A veces hay esferas rugosas no especulares, completamente opacas (hay dos en la Fig. 5, que también incluye dos trozos irregulares de vidrio) que son abundantes. Tales salpicaduras de vidrio podrían muy bien proceder del choque contra el suelo de unos glóbulos mayores que los originadores de esferitas. Realmente se puede razonar que la velocidad de enfriamiento y el correspondiente tiempo de vuelo son tales que sólo pueden subsistir las esferas pequeñas. Si al principio se forman gotas grandes y pequeñas de vidrio líquido, como la velocidad de enfriamiento es menor en los cuerpos mayores, podrían estar todavía suficientemente blandos a su llegada para esparcirse en las formas y tamaños que se observan.

Hay otra característica de las muestras de rocas lunares que refuerza grandemente esta teoría de los proyectiles. Muchas de las rocas grandes procedentes de la superficie lunar muestran picaduras revestidas de vidrio, de unos 2 mm de ancho, pero no mucho más grandes. Causan la impresión de que las superficies de las rocas han sido «tratadas a chorro» con esferitas de vidrio de hasta 2 mm de diámetro, esto es, golpeadas por un haz de proyectiles de vidrio de alta velocidad del tamaño indicado.

Cilindros de vidrio

Un hallazgo inesperado fue la presencia, en número considerable, de cilindros vítreos, relucientes, con extremos hemisféricos (Fig. 6), el mayor de 0,8 mm de largo. Junto a los objetos enteros se recogieron diez cilindros fragmentados, todos hendidos transversalmente de lado a lado. Hay cilindros tanto translúcidos de color ambarino, como opacos con lustre gris metálico. Las superficies son, a veces, muy especulares o están algo recubiertas de polvo. En ciertos casos había una estructura fina no resuelta, manifestada por efectos de difracción cromáticos. Algunos cilindros tenían una cola agregada y propiedades magnéticas, bastante irregulares en sus atracciones y repulsiones mutuas, de modo que sólo podía dominarse un grupo sobre el portaobjetos después de desmagnetizarlos. Tiene verdadera importancia, sin duda, la existencia de tales efectos magnéticos antes de haber sido sometidos al intenso campo de un imán portátil. No es probable que el campo terrestre indujera polaridad alguna, puesto que para desplazar los cilindros sobre el portaobjetos del microscopio había que aproximar un poderoso imán.

Es interesante el hecho de que varios cilindros y esferitas se desintegraran en polvo fino al tomarlos entre pinzas, conducta que hace recordar las antiguas «lágrimas de Batavia». Cualquier cuerpo que se desmenuza de este modo, indudablemente ha estado sometido a grandes tensiones. El examen, entre polarizadores cruzados, de los cilindros más transparentes mostró en efecto cierta birrefringencia por tensión, incluso en las muestras con forma más perfecta.

Además de los cilindros separados a mano, la observación de preparaciones de polvo bajo 800 aumentos mostró abundancia de cilindros minúsculos con extremos hemisféricos, la mayoría con color de ámbar.

Interferogramas de las esferitas

Se han hecho exámenes interferométricos de gran parte

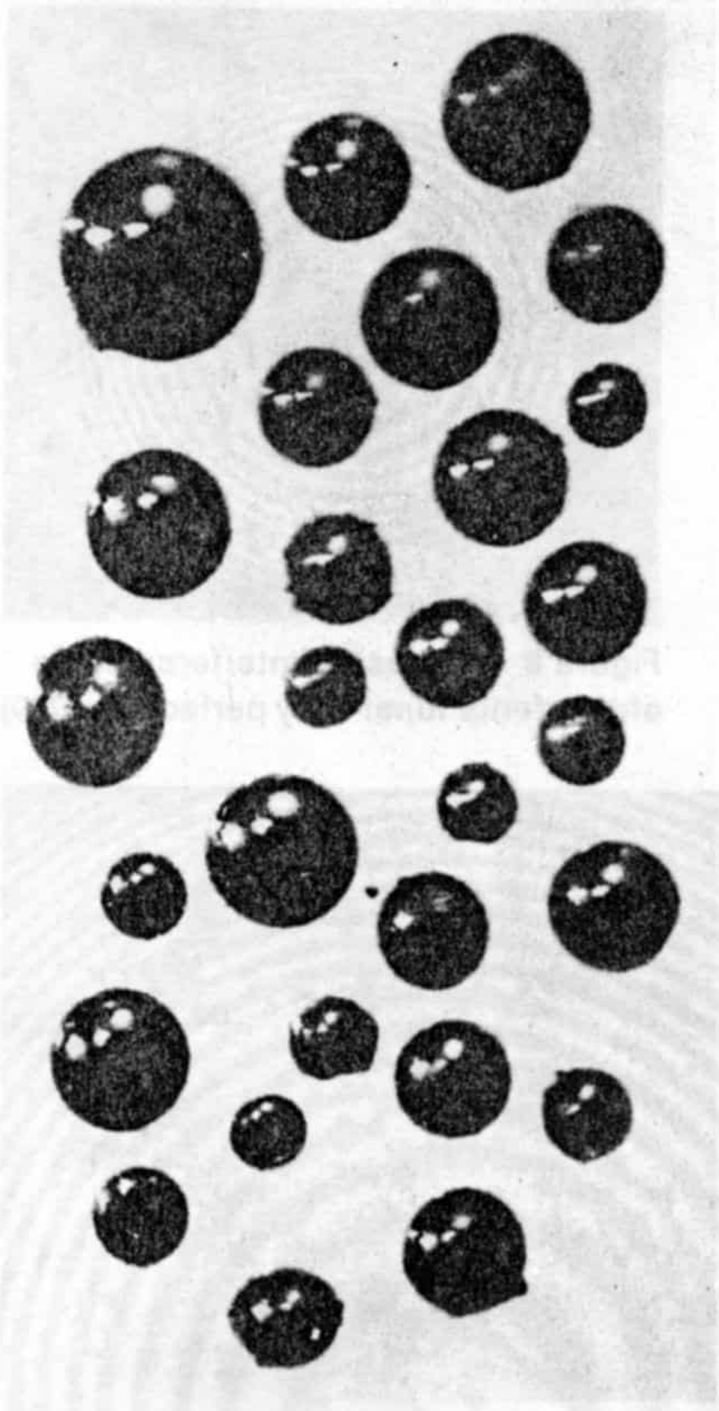


Figura 1 Esferitas vítreas lunares típicas. La mayor mide 0,75 mm de diámetro.

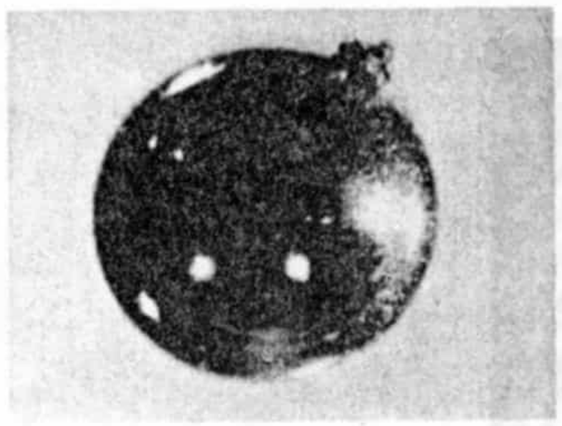


Figura 2 Esferita vítrea lunar con apéndice (diám. 0,5 mm).

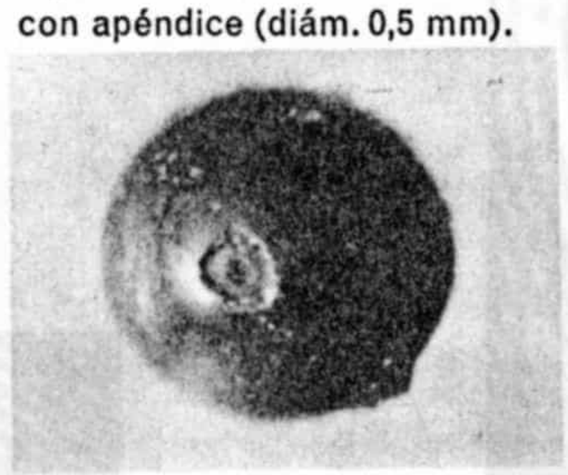


Figura 3 Esferita con micro-crater por impacto.

Figura 4 Esferitas con apariencia irregular debida al polvo adherido.

de los cuerpos especulares, tanto cilíndricos como esféricos. Cada uno se colocaba sobre un cubreobjetos de vidrio fino pulido, previamente seleccionado, que servía como plano óptico de referencia para luego observarlo a 500 aumentos, por lo menos, con un objetivo de 4 mm elegido para cumplir las condiciones ópticas que aseguren luz incidente paralela y exactamente colimada. Para la iluminación se usó tanto la luz blanca como la verde de mercurio. En los casos de duda se decidía si una característica topográfica observada era una elevación o una depresión a partir del espectro de franjas obtenido, examinando con luz blanca suplementaria. En el examen de los objetos más diminutos, las condiciones de iluminación fueron muy críticas.

Algunas de las esferas produjeron franjas de interferencia en anillos de Newton con sorprendente definición (Figs. 7 y 8). Hay mucho que deducir de tales espectros de franjas (obtenidos con luz verde de mercurio); así, la elevada definición prueba que la

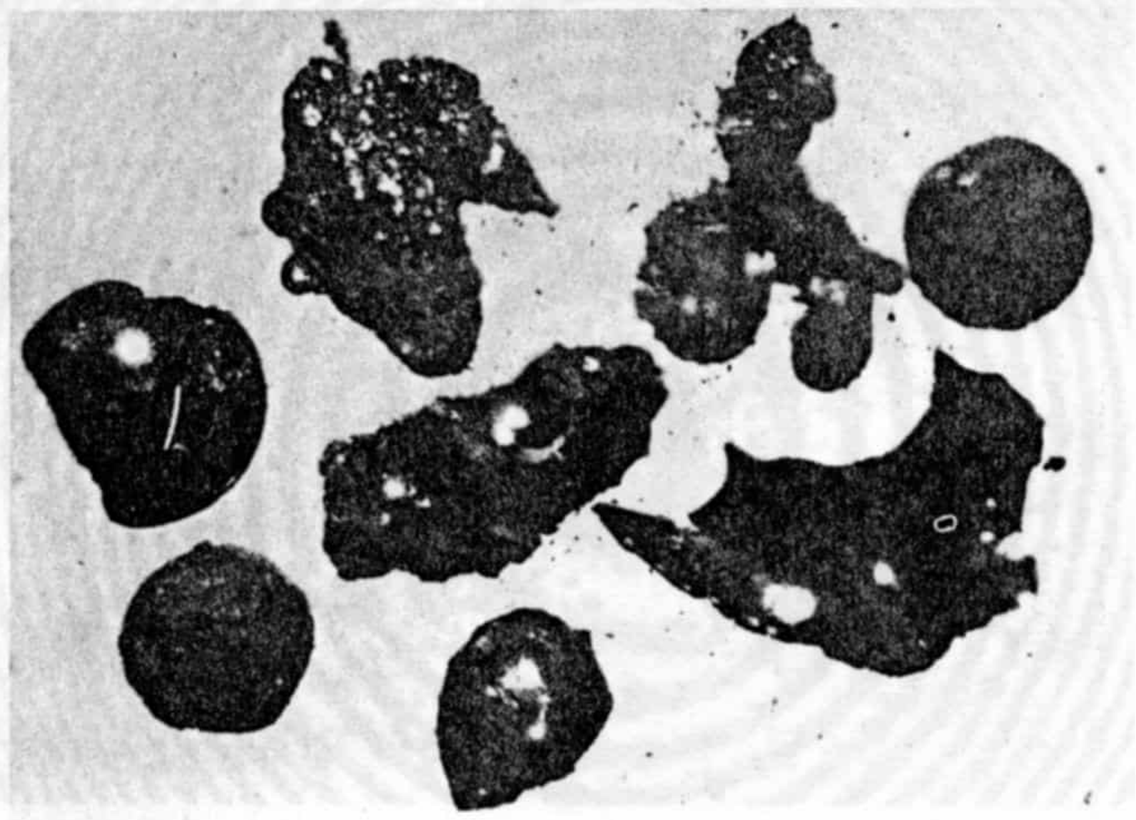


Figura 5 Esferitas irregulares, una de ellas rota; fragmento de cilindro y de salpicaduras de vidrio. Dia. de la esferita mayor: 1mm.

Figura 6 Cilindros vítreos, el mayor mide 0,8 mm de largo.

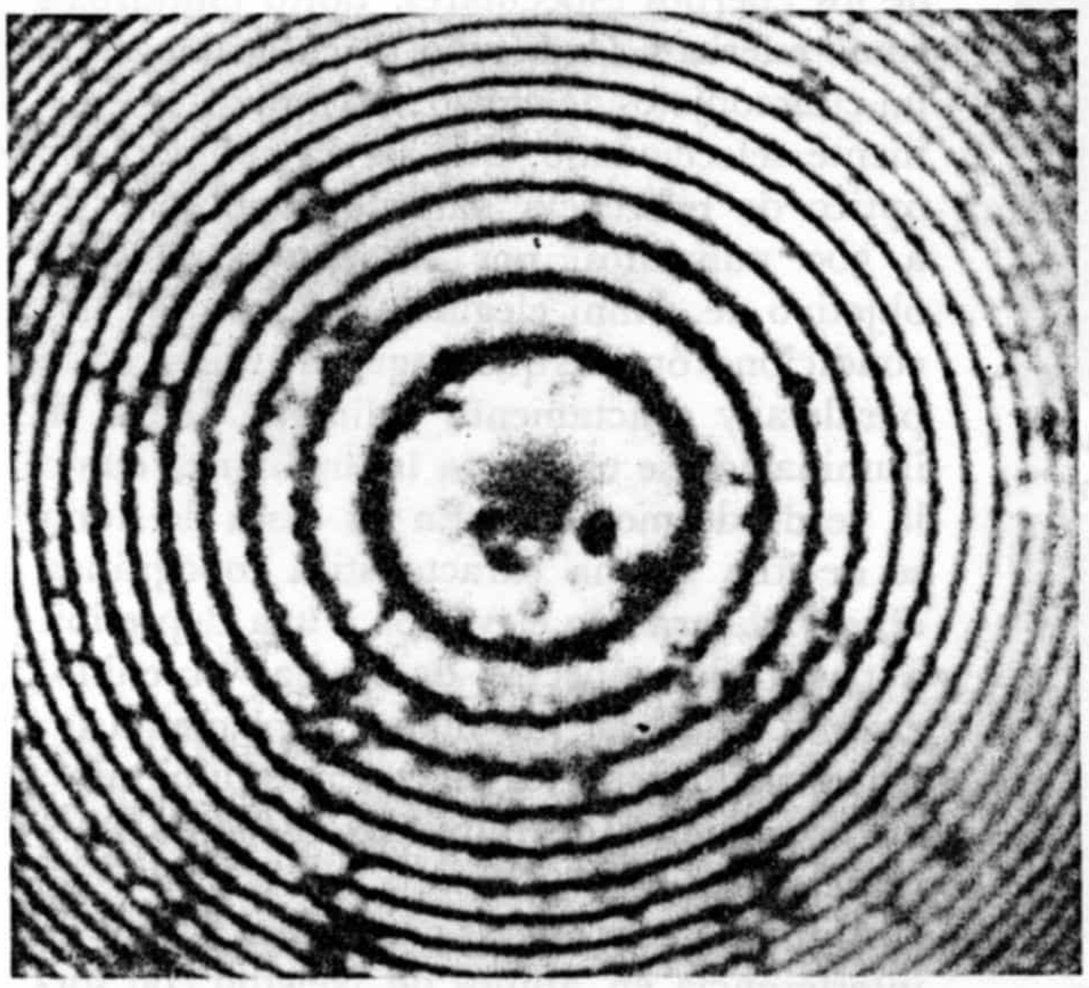


Figura 7 Sistema de franjas de interferencia producido por una esferita lunar muy perfecta. (×700)

Figura 9 Sistema de franjas que muestra una microgrieta poco profunda en una esferita. (×1000)

Figura 11 Sistema de franjas producido por un cilindro vítreo visto lateralmente. Se aprecia un solo estrechamiento. (×160)

Figura 12 Sistema de franjas producido por un cilindro, mostrando dos estrechamientos. (×260)

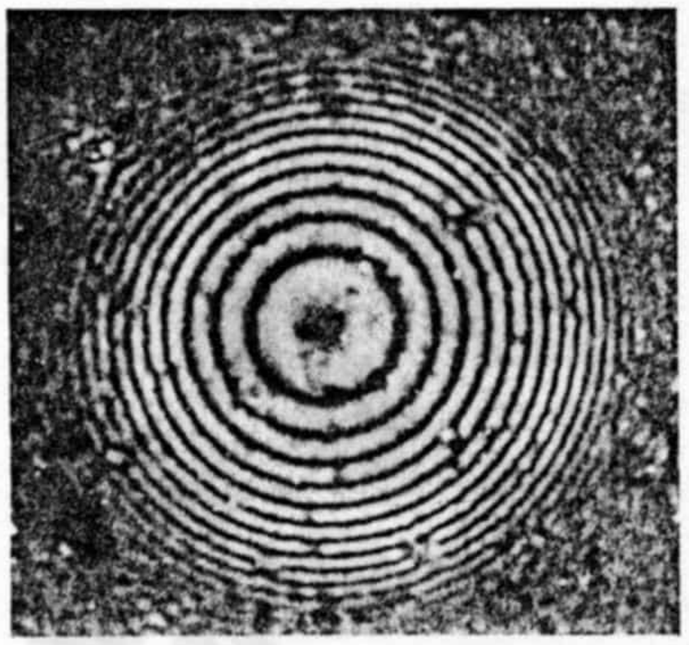


Figura 8 Franjas de interferencia de otra esferita lunar muy perfecta. (×700)

Figura 10 Sistema de franjas que muestra microerosión en una esferita. (×500)

especularidad es grande. Del excelente contraste entre los anillos iluminados y los obscuros se deduce que el índice de refracción en estos casos se aproxima mucho al del vidrio del cubreobjetos (1,55). Tiene interés recordar ahora que, según otros observadores [3], los índices de refracción de los cuerpos vítreos en sus finos aumentan al obscurecerse el color, yendo desde 1,46 para los incoloros muy claros hasta 1,75 para los pardos rojo obscuro. Estas cifras concuerdan con las de nuestras observaciones, pues hemos encontrado que con los objetos pardos muy obscuros (pero todavía translúcidos) aún podían obtenerse prácticamente franjas por transmisión. Esto es factible sólo con vidrios de índice de refracción sumamente grande y podemos estimar, por la aceptable visibilidad de tales franjas (especialmente cuando se comparan sobre superficies planas recubiertas de óxido de titanio) que el índice de refracción de tales objetos lunares no dista de 1,75.

La perfección uniforme y la regular configuración circular de las franjas en algunos casos demuestran que tales cuerpos son casi esféricos y no cabe duda de que deben haberse solidificado libremente a partir de gotitas

líquidas, de modo tal que la forma quedó determinada únicamente por fuerzas de tensión superficial. Cuando se imagina que muchos de los objetos han permanecido junto a la superficie lunar durante largos períodos (probablemente muchos millones de años), la gran especularidad de las franjas indica la total ausencia de cualquier efecto de erosión o corrosión atmosférica.

Es notable que varios de los espectros de franjas muestren que los objetos correspondientes han sido proyectiles de gran velocidad, confirmando anteriores conclusiones nuestras. Así, la Fig. 9 es el espectro de franjas de una esferita y muestra la existencia de una microgrieta alargada, de sección en V, que va disminuyendo en profundidad desde un máximo de media longitud de onda. Esta es una microgrieta que seguramente se produjo por impacto. La Fig. 10 es más sorprendente, pues en este objeto el espectro de franjas prueba muy claramente que se han desprendido algunas porciones pequeñas, casi con seguridad a causa de un impacto. Cuando un objeto se desmenuza debido a tensiones internas, difícilmente puede arrojar el tipo de partícula que estas franjas indican ha debido ser arrancada.

Resulta incontestable la prueba general de que muchas esferitas han sido proyectiles de gran velocidad. Los apéndices adheridos, los microcráteres, las esferas hendidas a veces y, por último, la prueba interferométrica del impacto, todo lleva a la misma conclusión.

Interferogramas de los cilindros

Los interferogramas obtenidos con los cilindros puestos lateralmente son desconcertantes. Los cilindros hendidos pueden ponerse sobre sus extremos hemisféricos y entonces dan anillos de Newton circulares normales, como cabe esperar; pero el caso es distinto con cilindros intactos colocados lateralmente que dan, en su mayoría, un espectro de franjas típico (Fig. 11). Resulta obvio que el cilindro ha sido parte de un filamento de vidrio fundido que se solidificó antes de poder dividirse en dos gotas independientes por efecto de las fuerzas de la tensión superficial. Lo prueba el estrechamiento interferométrico. En dos casos (la Fig. 1 representa uno de ellos) el cilindro iba a romperse en tres gotas, pero se solidificó antes. La proporción relativamente grande de cilindros hendidos indica que esta circunstancia origina tensión. En efecto, algunos de los fragmentos de cilindros rotos muestran todavía tensión residual cuando se examinan con luz polarizada.

Es destacable que con aumentos de $\times 800$ también hemos encontrado en el polvo numerosos cilindros minúsculos de color ambarino, pero demasiado pequeños para separarlos y manejarlos.

Consideraciones

Lo primero que resalta es el enorme número de objetos. Si nuestra muestra es representativa, la cantidad de objetos que pueden manejarse con facilidad asciende a no menos de 40 000/kg en el polvillo lunar. A esto ha de añadirse el asombroso número de microscópicos objetos, cilíndricos y esféricos, presentes. Si realmente toda la Luna está recubierta con polvo fino, el número de bolitas vítreas allí existente rebasa lo imaginable. Proponemos aquí dos hipótesis para explicar tanto la cantidad como la diversidad. Todas las pruebas señalan la existencia en la Luna de un grandísimo número de cráteres por impacto de meteoritos. Se admite generalmente ahora, a causa de la analogía en edad y composición química, que el enorme número de tectitas halladas en la Tierra en cualquier campo de tectitas, se ha originado por un solo choque de meteorito. En realidad, los cuerpos tectíticos pequeños tendrían escasa probabilidad de sobrevivir tanto a las condiciones iniciales de resistencia en la atmósfera, como a los efectos posteriores de corrosión atmosférica, pero es posible que el choque de meteoritos contra la Tierra haya originado muchos más cuerpos vítreos que los hallados ahora.

Si un impacto produce un grandísimo número de objetos identificables, dado el enorme número de cráteres lunares cabe esperar que se haya producido una cantidad inimaginable de cuerpos tectíticos. Hay dos orígenes posibles para esta clase de cuerpos. Uno por ablación o fusión del meteorito incidente, en cuyo caso las tectitas deberán ser de la substancia del meteorito, pero esto no parece ser así. El otro origen es la roca terrestre fundida y salpicada a grandes distancias como consecuencia del terrible impacto. La configuración de las tectitas apoya este supuesto. Por analogía se puede suponer que un impacto de un meteorito de enorme tamaño sobre la Luna haya producido la fusión y ulterior salpicadura. Por la falta de atmósfera, todas las gotitas esparcidas tendrán forma esférica. Los cuerpos pequeños se solidificarán en vuelo, pero los mayores pueden llegar líquidos a la superficie y salpicar. Las diferentes regiones originarias (y hay muchas incluso en una zona limitada) pueden producir cuerpos de diversa composición, explicando así los distintos colores observados en los objetos. Las gotitas son los proyectiles postulados.

Otra hipótesis muy relacionada con ésta podría explicar la ausencia de esferas grandes. Supongamos que el meteorito incidente productor del cráter causa una fusión amplia en la base del cráter, esto es, origina una gran masa de vidrio fundido. Admitamos que como consecuencia del gas englobado o por un efecto volcánico secundario se produce un violento desprendimiento de gas explosivo mientras la masa está fundida. En estas condiciones habría una gigantesca fuente de vidrio en pequeñas gotitas y filamentos. Este tipo de proceso podría también relacionarse con nubes eruptivas de sólidos circundantes, creando las condiciones necesarias para los microcráteres. Este modelo de fuente explicaría la ausencia de cuerpos más grandes. Si este criterio fuera correcto, podría preverse que las bases internas de muchos de los cráteres más grandes son lagos de vidrio solidificado.

Referencias

[1] Tolansky, S. *Nature, Lond.*, **222**, 259, 1969.
[2] Adler, I. *et al. Science, N.Y.*, **167**, 590, 1970.
[3] Frondel, C. *et al. Ibid.*, **167**, 681, 1970.
[4] McKay, D. S. *et al. Ibid.*, **167**, 654, 1970.
[5] Keil, K., Prinz, M. y Bunch, T. E. *Ibid.*, **167**, 597, 1970.